

无线 Ad Hoc 网络中 QoS 感知的跨层资源分配算法*

韩冰青^{1,2+}, 张宏¹, 刘凤玉¹, 陈伟²

¹(南京理工大学 计算机科学与技术学院,江苏 南京 210094)

²(南京审计学院 信息科学学院,江苏 南京 210029)

QoS-Aware Cross Layer Resource Allocation Algorithm in Wireless Ad Hoc Networks

HAN Bing-Qing^{1,2+}, ZHANG Hong¹, LIU Feng-Yu¹, CHEN Wei²

¹(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

²(School of Information and Science, Nanjing Audit University, Nanjing 210029, China)

+ Corresponding author: E-mail: hbq_2000@163.com

Han BQ, Zhang H, Liu FY, Chen W. QoS-Aware cross layer resource allocation algorithm in wireless ad hoc networks. *Journal of Software*, 2010,21(12):3138–3150. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3773.htm>

Abstract: Based on analyzing the resource allocation model in wireless Ad Hoc networks, a QoS-aware cross layer resource allocation algorithm, CL-QARA (cross layer QoS aware resource allocation) algorithm, is proposed. The purpose of CL-QARA algorithm is to introduce price and QoS bandwidth to measure resource allocation. The dynamic resource allocation information in the network layer is combined with the CSMA/CA admission control in the MAC layer to improve the backoff algorithm. A new backoff algorithm and call admission control algorithm is designed to implement a cross layer technique between the MAC layer and network layer. The QoS-aware resource allocation algorithm cooperates with the cross layer technique to provide the QoS guarantee. The simulation results show that CL-QARA has good convergence and stability. Compared to other algorithms, CL-QARA provides better QoS guarantee. CL-QARA also improves the network utility and performance.

Key words: resource allocation; ad hoc network; QoS; cross-layer technique; price

摘要: 在分析无线 Ad Hoc 网络资源分配模型的基础上,提出一种 QoS 感知的跨层资源分配算法 CL-QARA (cross layer QoS aware resource allocation).其主要思想是,引入价格作为资源分配的度量指标,以 QoS 带宽需求为参数,将网络层的动态资源分配信息与 MAC 层 CSMA/CA 接入机制相结合,以改进 MAC 层的冲突退避算法.设计了改进的退避算法和呼叫接入控制算法,以实现 MAC 层与网络层的跨层技术.通过 QoS 感知的资源分配算法和跨层技术协同工作,为 QoS 服务提供了业务保障.仿真结果表明,CL-QARA 算法具有良好的收敛性和稳定性.与其他算法相比,CL-QARA 能够有效地提供 QoS 保证,提高了网络的效用和性能.

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60903027, 70701018, 70971068 (国家自然科学基金); the Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China under Grant Nos.BK2007593, BK2009396 (江苏省自然科学基金); the National Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions of China under Grant No.10KJB520008 (江苏省高校自然科学基金项目)

Received 2009-02-28; Revised 2009-07-06; Accepted 2009-11-09

关键词: 资源分配;Ad Hoc 网络;服务质量;跨层技术;价格

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

Ad Hoc 网络是一种特殊的无线移动通信网络,它是由一组带有无线收发装置的移动节点组成,无须基站支持的动态可重构的多跳自组织网络.Ad Hoc 网络中所有节点的地位平等,无须设置任何中心控制节点,具有较强的容错性、鲁棒性和抗毁性^[1].Ad Hoc 网络存在着无线多跳连接、节点移动这两个本质的特点.当通信的源节点和目的节点不在直接的传输范围之内时,它们可以通过多个中间节点转发报文进行通信,即报文要经过多跳(hop)才能达到目的地,这是 Ad Hoc 网络与其他移动通信网络的最根本区别.Ad Hoc 网络的另一个重要特点是节点移动导致其拓扑结构发生动态变化,这种不确定性时变的特点,使得在其他网络中行之有效的办法(如 Internet 网络上的资源分配方法)不能简单地移植到 Ad Hoc 网络中.

资源分配是目前无线网络领域中的主要研究热点之一,在无线移动网络中为用户提供服务质量(QoS)支持已成为一种必然的趋势,合理的资源分配是保证服务质量的关键.无线 Ad Hoc 网络具有一些特殊的性质,如不可预知的链路属性、节点移动性、动态拓扑、有限电池寿命等,如何在这样的特殊环境中提供服务质量(QoS)保证以满足实时业务的传输要求,成为一个新的挑战.

资源分配技术在有线网络中已经比较成熟,文献[2,3]对传统的有线网络的竞价进行了研究,结果表明,竞价是裁决资源分配的一种有效手段,价格驱动策略能够有效地分配网络资源,达到网络效用的全局最优.然而,已有的有线网络资源分配理论不能直接用于无线 Ad Hoc 网络.

无线网络中的资源分配技术只是近些年才引起许多研究者的高度重视^[4-8].现有的一些无线网络协议如 IEEE 802.11,MACAW 和 CB-fair,都没有取得很好的公平性^[4].文献[5]所提出的无线网络带宽分配策略只能保证其带宽分配是可行的,不能保证其公平性.文献[6]以公平性为目标来分配网络资源,但没有涉及网络资源分配的效率.Xue, Li 等人^[7,8]研究了无线 Ad Hoc 网络的价格理论,提出了一种资源分配算法 GPA,并通过非线性的编程方法来求解问题.Curescu 等人^[9,10]提出了一种基于效用的时间-意识资源分配算法 TARA,在采用了拉格朗日乘子基础上,增加了竞价策略进行资源分配,并对网络资源分配的效率进行了研究.Luthi 等人^[11]对上述两种资源分配算法进行了性能对比实验,结果表明,在高速动态移动网络中,TARA 算法表现出了更好的适应性.然而,上述方法都没有考虑到在无线 Ad Hoc 网络的动态环境中提供服务质量(QoS)保证,以满足实时业务的传输要求.

本文主要致力于以下两个方面的研究:(1) 研究无线 Ad Hoc 网络的价格理论和资源分配算法.引入价格作为资源分配的度量指标,增加竞价策略进行资源分配;(2) 研究在 MAC 层提供可区分的无线自组织网络资源分配的机制和服务质量保证,考察在网络层如何快速形成选路并支持服务质量保证的问题,并将 MAC 层和网络层相结合,实现一种新的 QoS 感知的跨层资源分配算法 CL-QARA.

为考察本文所提出算法的有效性,分别针对静态网络和动态网络设计了不同的仿真场景:静态网络采用交叉拓扑,动态网络采用随机拓扑.仿真结果表明,CL-QARA 算法具有良好的收敛性,对网络状态的变化具有自适应能力.与其他算法相比,CL-QARA 算法能在不同优先级业务之间按比例分配网络资源,有效地提供 QoS 保证,更好地提高了网络的效用和性能.

1 无线 Ad Hoc 网络资源分配模型

1.1 Ad Hoc 网络的特点和性质分析

Ad Hoc 网络和一般移动通信一样具有信道、用户和业务这 3 种动态特性,即:(1) 信道的动态性.主要表现为信道受自然和大气环境的影响极大,信道参数随时间快变化;(2) 用户的动态性.具体表现为信道随用户的移动而产生较快的变化,带宽不稳定;(3) 业务的动态性.具体表现为用户可随机自由选择不同媒体的通信方式,各类用户不同的媒体业务要求互不干扰.除这些公共的特性,Ad Hoc 网络因其无基础设施的多跳特性,使其具有比一般无线通信更为复杂的信道特性,主要是其信道是多跳共享的多点信道.Ad Hoc 网络节点存在隐藏终端、

暴露终端和入侵终端等问题.这些问题的存在,使得传统的无线资源分配不再适用于 Ad Hoc 网络中.

1.2 基本优化问题

在已有的研究成果中有两类实现资源分配的方法:一类是利用效用函数的方法,一类是在接口队列层或 MAC 层采用公平包调度的方法.本文采用基于效用函数的资源分配方法.

定义流 $f \in F$ 的效用函数为 $U_f(x_f)$, 表示相应的端用户对数据流速率的满意度.假设效用函数 $U_f(x_f)$ 单调递增、严格凹而且二阶连续可微,则可以将 Ad Hoc 网络的资源分配问题表达成一个非线性优化问题,其目标是最大化所有端-端数据流的总效用,有如下形式:

$$P^* := \max_{f \in F} \sum U_f(x_f) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{f \in F} R_{qf} x_f \leq C_q, \quad \forall q \in Q \quad (2)$$

$$0 \leq x_f \leq M_f \quad \forall f \in F \quad (3)$$

在公式(3)中, M_f 为流 f 的最大可获得带宽.公式(1)中的目标函数给出了相应的资源优化问题:即最大化所有流的总效用.公式(2)为集群 q 的资源约束条件:对于任意集群 q ,各数据流速之和不能超过集群 q 无线信道的容量.公式(3)表明,任意数据流速率不能超出该数据流的最大可获得带宽.

由于公式(1)的目标函数是严格凹的连续可微函数,并且由问题的约束条件(2)和约束条件(3)所定义的可行解域是凸的和紧致的,根据优化理论,源节点必然存在关于发送速率的唯一最优解.当获得公式(1)的最优解时,也就达到了兼顾效用和公平性的最优资源分配.

1.3 Ad Hoc网络的价格相关概念

设式(1)的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(x, \mu) &= \sum_{f \in F} U_f(x_f) - \sum_{q \in Q} \mu_q \left(\sum_{f \in F} R_{qf} x_f - C_q \right) \\ &= \sum_{f \in F} U_f(x_f) - \sum_{f \in F} x_f \left(\sum_{q \in Q} \mu_q R_{qf} \right) + \sum_{q \in Q} \mu_q C_q \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\mu = (\mu_q, q \in Q)$ 为拉格朗日乘子, μ_q 可以看作是集群 q 的链路尾随价格.从公式(4)可知,拉格朗日函数的第一项是关于 x_f 可分离的,因此有

$$L(x, \mu) = \sum_{f \in F} \left(U_f(x_f) - x_f \sum_{q \in Q} \mu_q R_{qf} \right) + \sum_{q \in Q} \mu_q C_q \quad (5)$$

式(1)的对偶公式是

$$D^* := \min_{\mu \geq 0} D(\mu) \quad (6)$$

其中, $D(\mu)$ 定义为^[8]

$$D(\mu) = \max_{x \in X} L(x, \mu) = \sum_{f \in F} \max_{x \in X} \left(U_f(x_f) - x_f \sum_{q: f \cap q \neq \emptyset} \mu_q R_{qf} \right) + \sum_{q \in Q} \mu_q C_q \quad (7)$$

再定义

$$\lambda_f = \sum_{q: f \cap q \neq \emptyset} \mu_q R_{qf} = \sum_{l: l \in f} \sum_{q: l \in q} \mu_q \quad (8)$$

在公式(8)中, μ_q 可以看作通过极大集群 q 的单位流量的成本,即集群 q 的尾随价格;同时, λ_f 则可解释为数据流 f 的尾随价.令 w_f 为单位时间流 f 的支付量,则获得一个相应的分配速率 $x_f = w_f / \lambda_f$.

2 QoS 感知的 Ad Hoc 网络资源分配算法 QARA

2.1 基本的资源分配算法SRA (standard resource allocation)

令

$$\varphi_f(x_f) = U_f(x_f) - \lambda_f x_f \quad (9)$$

定义 x_f 需求函数

$$x_f(\lambda_f) = \arg \max_{x_f \in I_f} \{\varphi_f(x_f)\} \quad (10)$$

下面通过梯度下降法^[12]来求解公式(7)的对偶问题. 集群尾随价格的调整方向是按照目标函数的负梯度方向 $\nabla D(\mu)$, 可得到集群 q 的价格更新公式:

$$\mu_q(t+1) = \left[\mu_q(t) - \gamma \frac{\partial D(\mu(t))}{\partial \mu_q} \right]^+ \quad (11)$$

其中, γ 为迭代步长, t 为迭代步数. 既然 U_f 为严格凹函数, 则 $D(\mu)$ 为连续可微函数^[12]. 基于公式(7)和公式(8), 可以得出如下等式:

$$\frac{\partial D(\mu)}{\partial \mu_q} = C_q - \sum_{f: f \cap q \neq \emptyset} x_f(\lambda_f) R_{df} \quad (12)$$

将公式(12)代入公式(11), 可得到:

$$\mu_q(t+1) = \left[\mu_q(t) - \gamma \left(C_q - \sum_{f: f \cap q \neq \emptyset} x_f(\lambda_f(t)) R_{df} \right) \right]^+ \quad (13)$$

公式(13)反映了价格供需的规律: 当集群 q 的带宽需求超过了它的带宽供给 C_q , 则违反了资源约束条件, 相应的集群尾随价格 μ_q 就会增加; 反之, 当带宽需求少于带宽供给时, μ_q 则会减少. 公式(8)和公式(13)就构成了资源分配算法的基础, 它是分布式的.

下面给出基本的资源分配算法(SRA):

- (1) 初始化所有集群 q_1, q_2, q_3, \dots 的价格 $\mu_q(0)$
- (2) 根据式(13)计算 $\mu_q(t+1)$
- (3) if $\mu_q(t+1) > \mu_q^*$
- (4) $x_f(t+1) = [x_f(t) - \delta_f(\mu_q(t+1) - \mu_q(t))]^+$
- (5) else
- (6) $x_f(t+1) = x_f(t) + \Delta$

在上述的资源分配算法中, $x_f(t)$ 是数据流 f 的速率, $\mu_q(t)$ 是集群 q 的价格, Δ 是数据流速率的增量, δ_f 为常量. 由于考虑到少量的随机突发数据, μ_q^* 是一个较低的价格阈值且为一小的正数. 上述算法首先初始化所有集群 q 的初始价格, 接着根据网络情况计算集群 q 的新价格 $\mu_q(t+1)$. 若新价格超出阈值 μ_q^* , 则更新相应的数据流速率; 若未超出阈值, 则表明该集群 q 中无随机突发数据流, 则对数据流速作相应的调整. 数据流速率更新一次的过程称为一个调度周期, 一个调度周期结束后进入下一轮调度周期, 是一个迭代的算法.

2.2 MAC层的IEEE 802.11 DCF改进方案

2.2.1 DCF 的原理

IEEE 802.11 中的 DCF 方式是基于 CSMA/CA 机制的协议. DCF 核心机制包括: 四握手机制、载波检测(CS)机制、帧间间隔(IFS)和随机退避(backoff)算法. 在 DCF 模式下, 一个节点在开始传输分组前必须侦听介质. 如果侦听到介质空闲且空闲时间大于 DIFS, 则该节点可以发送 MAC 帧; 否则, 传输延迟开始直至监测到所需帧间隔时长, 然后随机选择退避时间值进入退避过程, 退避结束后重新开始上述过程. IEEE 802.11 MAC 采用二进制随机退避算法 BEB(binary exponential backoff)计算退避时间值.

$$W_{ime}=Random(0,CW)\times SlotTime \tag{14}$$

其中,CW 是竞争窗口,在 IEEE 802.11 标准中,SlotTime 为 IEEE 802.11 标准规定的一个时隙所占用的时间.BEB 算法的 F_{inc} 和 F_{dec} 函数描述如下:

$$\begin{cases} F_{inc} = \text{Min}(2 \times CW, CW_{max}) \\ F_{dec} = CW_{min} \end{cases} \tag{15}$$

每次交互成功时,就对竞争窗口执行 F_{dec} 操作;每次发生冲突时,就对竞争窗口执行 F_{inc} 操作.也就是说,每次发送冲突时,退避时间加倍,发生成功则节点退避时间减到最小.很明显,BEB 算法总是给最后一次发送成功的节点以最大的竞争优先权.这样会给信道争用带来不公平的现象;同时,BEB 算法不存在区分服务的可能.

2.2.2 DCF 改进方案

在 MAC 层,以 IEEE 802.11 DCF 协议为基础,主要对帧结构、接入队列和退避算法进行了修改:

(1) 传统的 DCF 协议仅仅支持单优先级的服务,而不支持多优先级的区分服务.我们在 RTS 帧中增加 Price 价格字段和 Level 优先级字段,在 CTS 帧中增加 Level 字段,如图 1 所示.当 Level=1 时,为尽力而为的业务;当 Level=2 时,为相对优先级的业务;当 Level=3 时,为绝对优先级的业务.Level 数值越大,表明该业务的优先级越高,在进行资源分配时,通过对不同业务优先级的区分,从而为高优先级业务的 QoS 服务提供保证.

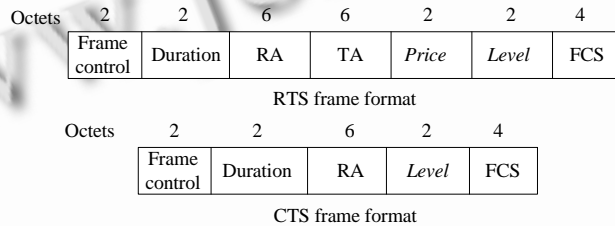


Fig.1 Modified frame format of RTS and CTS

图 1 修改后的 RTS 帧和 CTS 帧格式

(2) 在 IEEE 802.11 的 DCF 协议中,仅有一个服务队列,所有级别的业务在传输前都在这个队列中等待.因此,往往有些实时性的数据无法立即被服务,而非实时性的数据却占用信道的时间.为了能够在实时多媒体业务与数据传输业务之间实现区分服务,我们按各种业务相应的服务质量需求而它们提供不同的接入队列.如图 2 所示,在一个 DCF 实现的站点中,我们使其 MAC 包含 3 个并行运行的 DCF 服务队列,每一个队列与一种优先级的应用相对应.每一个队列有各自的 $DIFS, CW_{min}$ 和 CW_{max} 参数,不同的参数设置见表 1.

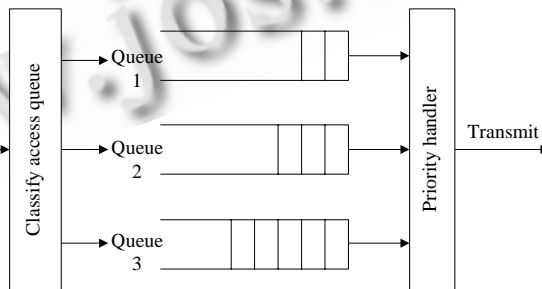


Fig.2 DCF parallel access queues in station

图 2 DCF 站内并行接入队列

Table 1 Parameters setting of each queue

表 1 各队列参数设置

Access queue	Level	Traffic	DIFS	CW_{min}	CW_{max}
--------------	-------	---------	------	------------	------------

1	1	Best effort	3	31	1 024
2	2	Middle priority	2	15	128
2	3	High priority	2	7	32

(3) IEEE 802.11 DCF 中采用的退避算法是二进制指数退避算法 BEB.为了提供区分服务并保证节点的公平性,我们将数据流价格“Price”和业务服务等级“Level”结合起来,定义信道权重 P 如下:

$$P = \alpha \times Price + \beta \times Level \tag{16}$$

其中, α, β 是平衡 Price 和 Level 的权重因子,并设定一基础权重 P_{bas} 作为区分网络竞争程度是否激烈的门限值.

当 $P > P_{bas}$ 时,说明数据流的价格较高或者业务流优先级较低,表示网络竞争激烈.当发送成功时,使用 $\max(CW/2, CW/P)$ 作为新的 CW,以便在必要时使 CW 适当地减少;当发送失败,使用 $2 \times \max(CW, CW/P)$ 作为新的 CW,这样可以缓解网络竞争.设定发送新报文的竞争窗口公式如下:

$$\begin{cases} CW_{prior} = \max(CW/2, CW/P), & \text{若发送成功} \\ CW_{prior} = 2 \times \max(CW, CW/P), & \text{若发送失败} \end{cases} \tag{17}$$

当 $P < P_{bas}$ 时,表示网络竞争比较缓和.成功发送报文后,则使用 CW 自动减 1 来更新 CW;当发送失败,使用 $CW_{prior} = 2 \times \min(CW, CW/P)$,以便在必要时使 CW 尽快地增大.设定发送新报文的竞争窗口公式如下:

$$\begin{cases} CW_{prior} = CW - 1, & \text{若发送成功} \\ CW_{prior} = 2 \times \min(CW, CW/P), & \text{若发送失败} \end{cases} \tag{18}$$

2.2.3 改进方案性能分析

算法的改进之处首先在于实现了业务区分服务,将业务流分成 3 种优先级,则只需检测优先级字段,不同 QoS 服务需求的业务分别进入到其对应的队列里,以此调节高低优先级业务量的传输和碰撞概率;其次对退避算法进行了改进,在退避时比较有无比自身优先级高的业务.若无,则按自身一级的业务退避窗口进行退避.同时引入权重参数 P ,将数据流价格“Price”和业务服务等级“Level”结合起来以实现动态退避,减小了两个竞争节点的退避时间在同一时刻递减为 0 的可能性.此外,竞争窗口 CW 的值可以根据系统竞争的激烈状态加以调节,对于高负载的系统,选择较大的值,减少报文冲突;对于低负载的系统,则可选择较小的值,减少不必要的时延.

2.3 QoS感知的资源分配算法

呼叫接入控制(call admission control,简称 CAC)和速率控制(rate control,简称 RC)是无线资源分配的重要内容,也是无线网络服务质量 QoS 机制的重要组成部分.呼叫接入算法根据信道分配请求和传输速率要求,通过带宽预测算法得到网络可用带宽和呼叫接入后的系统负载,在接入新呼叫不会导致系统负载恶化的情况下,为新呼叫分配信道.当高优先级业务接入网络会造成系统负载恶化时,如果系统中仍有可用带宽,则通过速率控制算法调节低优先级业务的流量,达到对无线带宽资源的最大化利用.

本文在带宽预测算法的基础上进一步提出了一种新的 QoS 感知的资源分配算法 QARA.主要包括两方面的内容:呼叫接入控制算法和速率控制算法.一个业务的 QoS 需求通常包括了带宽、时延、时延抖动和误码率等,本文主要考虑如何来满足对于带宽的需求.

(1) 本地可用带宽的预测算法

把 QoS 请求带宽作为接入控制的参数,以保证路径上的各个节点都具有符合 QoS 要求的带宽.为此,需要计算从源端到目的端的中间节点的本地可用带宽.本文使用文献[13]中的方法来计算节点的本地可用带宽.在 T 秒的采样时间内监测信道忙时间 T_b ,这样,节点的本地可用带宽预测可由公式(19)估算出来.

$$B_a = (1 - T_b/T) \times B_c \tag{19}$$

(2) 呼叫接入控制算法 CAC

设某个新业务流 u 的 QoS 带宽请求为 B_q ,为了保证已接入业务流的服务质量要求,新业务流的带宽要求必须小于网络的剩余带宽.根据公式(19)的带宽预测方法,可得到网络的剩余带宽 B_a ,那么只要满足 $B_q \leq B_a$,就允许新业务流接入网络;否则,禁止新业务接入网络.

(3) 速率控制算法 RC

实时业务通常都对带宽具有比较严格的要求,因此必须用速率控制算法避免网络性能随业务增多而下降.与实时业务不同,尽力而为业务等非实时业务通常对带宽的要求较低,因此可以通过控制其发送速率达到既接入网络又能尽量利用网络带宽的目的.令 x_u 表示尽力而为业务的发送速率,则 x_u 的大小由网络剩余可用带宽 B_a 和新业务流的数据帧大小 L_u 共同决定^[14]: $x_u = B_a/L_u$.

下面给出 QoS 感知的资源分配算法(QARA):

- (1) 初始化所有集群 q_1, q_2, q_3, \dots 的价格 $\mu_q(0)$
- (2) 对每一集群 q_i , 每一数据流 f_i , 执行价格更新算法并调整流速:

```
if  $\mu_q(t+1) > \mu_q^*$ 
 $x_f(t+1) = [x_f(t) - \delta_f(\mu_q(t+1) - \mu_q(t))]^+$ 
```

```
else
```

```
 $x_f(t+1) = x_f(t) + \Delta$ 
```

- (3) 若网络中有新业务流 k 要求接入, 则执行接入控制算法 CAC:

```
计算网络的可用带宽  $B_a$ 
```

```
If  $B_q > B_a$ 
```

```
允许新业务流  $k$  接入网络并分配相应的带宽
```

```
Else
```

```
禁止接入网络
```

```
If 新业务流  $k$  为要求 QoS 服务的高优先级业务, 则
```

```
执行速率控制算法 RC, 调整尽力而为业务的数据流速
```

```
End IF
```

```
End IF
```

QARA 算法以第 2.2 节所描述的 MAC 改进协议为基础, 实现了 3 个子算法: 价格更新子算法、接入控制子算法和速率控制子算法. 该算法以 QoS 请求带宽为参数, 通过呼叫接入算法分配信道带宽, 通过速率控制算法调节传输速率, 通过价格更新算法调节集群价格, 以优化网络效用. 这 3 种子算法相互配合, 能合理地分配网络资源, 并能够感知 QoS 的带宽请求, 为无线网络的 QoS 服务提供了有效支持. 同时, 又因为引入价格更新算法, 能够有效地反映网络的流量需求. 因此, QARA 算法是一种支持 QoS 的资源分配算法并能有效提高网络总效用.

3 跨层的 QoS 感知的资源分配算法 CL-QARA

3.1 资源分配中跨层技术的引入

传统的分层协议体系结构可以简化协议的实现, 然而, 这种严格的分层设计方法不能很好地适应 Ad Hoc 网络的特点. 目前, 针对 Ad Hoc 网络的特点, 在网络的不同层展开了大量的研究. 但是, 这些研究基本上都是孤立的, 忽略了网络设计的整体需求和各层功能之间的相关性. Ad Hoc 网络的资源效率、QoS 支持、可靠性和可扩展性问题都涉及协议栈的各个层次, 并且各个层次的独立优化不一定会带来整个系统的性能优化.

跨层技术是提高 Ad Hoc 网络资源利用率的一种有效方式. 跨层就是在一定程度上打破或改变原有通信协议的协议层次, 改变原有协议层间的接口, 不同的协议层可以共享本地得到的信息, 这样可以避免使用多余的计算和分组交互来获得其他层次的信息, 大大降低了通信开销.

本文提出一种新的 MAC 层与网络层的跨层资源分配算法. 将网络层的动态资源分配算法与 MAC 层 CSMA/CA 接入机制相结合, 实现 MAC 层与网络层的跨层技术. 将网络层自适应带宽分配信息传递给 MAC 层, 以改进 MAC 层的冲突退避算法. 当分组到达 MAC 层时, 需要与其他链路竞争无线信道. 此时, 如果使用有优先级的接入方式, 即具有较高权重值的路径将得到较小的退避窗口, 在竞争中有更好的机会获得信道资源.

3.2 MAC层与网络层的跨层设计

跨层设计的目标是在无线 Ad Hoc 网络中提供端到端的 QoS 保证,CL-QARA 试图通过联合设计基于 802.11 DCF 的 MAC 改进协议和 AOMDV(ad-hoc on-demand multi-path distance vector)^[15]路由协议来实现这一目标.同时,为了获得一定的通用性,尽量减少对 AOMDV 协议的修改.

基于第 2.3 节给出的资源分配算法 QARA,设计了跨层的 QoS 感知的资源分配算法 CL-QARA,其体系结构图如图 3 所示.

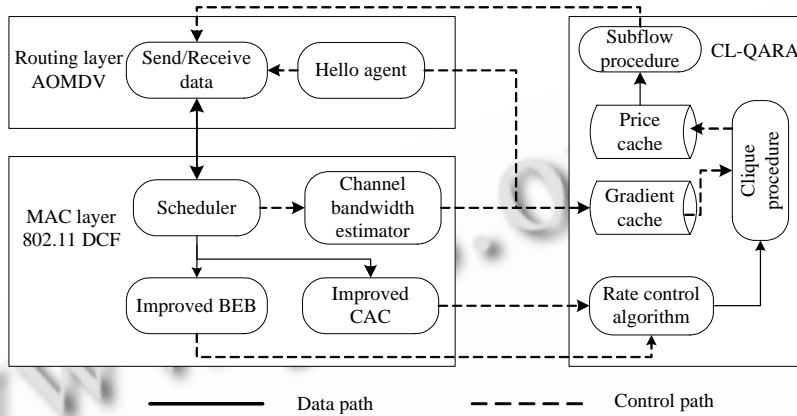


Fig.3 Cross layer architecture for CL-QARA

图 3 CL-QARA 跨层体系结构图

从图 3 中可以看到,CL-QARA 算法在 MAC 层对 802.11 DCF 协议进行了改进和扩展,设计了改进的退避算法和呼叫接入控制 CAC 算法,并由速率控制算法 RC 来传给集群进程相应的速率参数.通过信道带宽估计模块可以进行梯度的计算,并将其保存到梯度缓存表中,再由集群进程进行集群价格的计算和更新,将最新的集群价格保存至价格缓存表中,集群中的子流通过价格缓存表进行子流价格计算和更新.

3.3 网络层AOMDV路由协议修改

CL-QARA 算法在网络层以 AODV 多径路由协议 AOMDV^[15]为基础,进行了如下修改:

- (1) 在路由请求 RREQ 分组中增加“PRICE”价格字段及效用信息字段,源节点首先创建一个路由请求包 RREQ,并向其邻居节点广播.这样,源节点就可以通过路由发现来进行价格查询,而不必通过周期性的“HELLO”消息查询价格,减少了网络负荷;
- (2) 当中间节点收到路由请求后,对 RREQ 分组中的价格及效用信息进行计算,并生成到邻居节点的局部梯度(价格的变化);
- (3) 在路由响应 RREP 分组中增设“PRICE_UPDATE”字段,目的节点收到 RREQ 分组后建立反向路径,产生 RREP 应答分组,将路径上数据流各跳的价格相加从而得到总的聚焦价格.一旦发现总的聚焦价格变化,则置“PRICE_UPDATE”字段为 TRUE,通知源节点路由价格发生了改变;
- (4) 源节点接收到“PRICE_UPDATE”消息后,数据发送组件根据新的价格,通过速率更新算法调整源节点的发送速率.

将价格引入至 AOMDV 路由协议中,节点在多条备用路径中选择最优路径时,以路径价格、网络效用和 QoS 带宽这 3 个参数为权重因子,设定权重参数如下:

$$W = \sum_{i=1}^n (\alpha \times W_{PRICE}^i + \beta \times W_{UTILITY}^i + \gamma \times W_{BAND}^i) \quad (20)$$

其中,W 是路径权重, W_{PRICE}^i , $W_{UTILITY}^i$ 和 W_{BAND}^i 分别是节点 i 考虑价格、效用和 QoS 带宽所得到的权重, α, β, γ 是平

衡 W_{PRICE}^i , $W_{UTILITY}^i$ 和 W_{BAND}^i 的权重因子. W_{PRICE}^i 越小, $W_{UTILITY}^i$, W_{BAND}^i 越高, 则该路径被选用的可能性越大.

CL-QARA 算法在选取路径时, 选择价格较小、效用较高并且具有较高 QoS 保留带宽的路径. 在此基础上, 由权重大小 W 来调节 MAC 接入退避窗口的大小, 根据速率控制算法进行速率分配.

3.4 QoS感知的跨层资源分配算法CL-QARA

根据资源分配算法和 MAC 层接入及网络层路由的分析, 给出 CL-QARA 算法:

第 1 步. 根据 AOMDV 路由协议, 在源节点和目的节点间探测多条不交叠的路由路径.

第 2 步. 沿各条路径发送 HELLO 信息, 根据公式(8)、公式(13)由路径上的各中间节点计算并更新链路价格、网络效用、QoS 保留带宽. 根据公式(20)更新各条路径上的路径权重 W , 从多条路径中选择权重 W 最高的路径进行数据发送.

第 3 步. 由权重大小 W 来调节 MAC 接入退避窗口的大小, 根据公式(17)和公式(18)设定竞争窗口 CW .

第 4 步. 节点从 MAC 帧中提取和更新价格、网络效用、QoS 带宽等信息, 因超过一定时间未收到某节点的相应信息, 将表中某些节点的信息置为无效.

第 5 步. 以 QoS 请求带宽为参数, 通过改进的呼叫接入子算法 CAC 分配信道带宽.

第 6 步. 通过速率控制子算法 RC 调节不同优先级业务的流量, 当有要求 QoS 服务的高优先级业务时, 调整尽力而为业务、相对优先级业务的数据流速, 保障 QoS 业务的数据流.

第 7 步. 延迟一个调度周期之后, 重复执行第 2 步.

CL-QARA 算法将网络层的动态资源分配算法与 MAC 层 CSMA/CA 接入机制相结合, 实现 MAC 层与网络层的信息共享. 将网络层 QoS 带宽等信息传递给 MAC 层, 通过 MAC 帧中的价格、效用、QoS 带宽等信息, 提高信息交换的效率. 通过 BEB 改进算法、呼叫接入 CAC 改进算法及速率控制子算法协同工作, 为 QoS 服务提供了业务保障.

4 仿真研究

4.1 仿真环境及参数

采用 NS-2.32 仿真平台来分析 CL-QARA 算法的收敛性、网络吞吐量等性能, 并将 CL-QARA 算法与其他算法进行性能对比实验. 仿真的环境是: 各节点使用全向天线, 无线传播模型采用 TwoRayGround 模型. 信道带宽为 2Mbps. MAC 协议按文中修改后的 IEEE 802.11 DCF 协议(简称 HMAC 协议), 有效传输距离为 250m, 侦听距离为 550m; 路由采用按文中修改后的 AOMDV 协议(简称 HAOMDV 协议), 效用函数采用 $U_f(x_f) = \ln(x_f)$, 每个节点的缓存大小为 50. 数据包大小等于 1 000byte, 传输的业务为恒定比特速率(CBR)数据. 分别考察静态网络拓扑模式和动态网络拓扑模式下算法的性能, 具体参数设置见表 2.

Table 2 Simulation parameters

表 2 仿真参数设置

Parameters	Time	Traffic	Bandwidth	MAC protocol	Routing protocol
Values	600s	CBR	2Mbps	HMAC	HAOMDV

4.2 静态网络性能分析

研究静态拓扑的网络性能可以得到一些本质性的结论. 为了评价 CL-QARA 算法在静态网络中的性能, 我们考察了 CL-QARA 算法在收敛性、吞吐量稳定性、及公平性方面的性能.

静态拓扑的网络场景为一个 2 跳拓扑的网络场景, 有 2 个数据流, 如图 4 所示. 中间节点 3 在源节点 1、源节点 2 和目的节点 4 的通信范围内. 为了比较数据流的公平性, 源节点 1 和源节点 2 都发送数据到相同的节点, 都为恒定比特速率(CBR)数据源. 但数据传输速率不同, 源节点 1 的数据传输速率高于源节点 2 的数据传输速率.

(1) 收敛性分析

数据流速率分配随时间的变化如图 5 所示.其中:0~2s 时,流 flow 1,flow 2 被激活,流 flow 1 的初始数据发送速率比 flow 2 的速率高;在 2s~50s 时,流 flow 1 的分配速率逐步下降,而流 flow 2 的分配速率逐步上升.这表明了 CL-QARA 算法的公平性,将高速率的数据流速调低,将低速率的数据流速调高,以保证整个网络数据流分配的公平性;flow 1 和 flow 2 在 50s 左右时,数据流速就逐步稳定下来;50s~200s 期间基本不变,仿真结果验证了 CL-QARA 算法的收敛性.图 5 也反映了价格需求关系:初期源节点 1 的数据发送速率较高,flow 1 的路由价格较低;中期路由价格逐步变高时,源节点 1 选择较低的发送速率,随价格的变化而自适应变化;后期经过调整震荡后收敛为固定值.

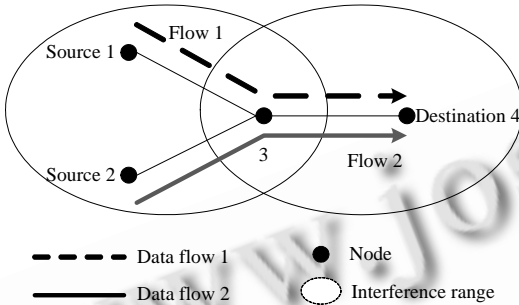


Fig.4 Static topology scene

图 4 静态拓扑场景

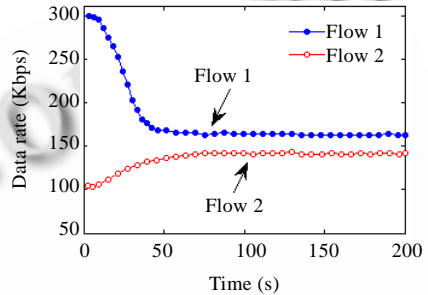


Fig.5 Rate allocation of data flow

图 5 数据流速率分配

(2) 数据流价格分析

图 6 表明了两个数据流的价格随时间的变化关系.可以看到:初始时,流 flow 1 和流 flow 2 的价格相同;在 0s~50s 时,2 个数据流的价格都呈下降趋势,流 flow 1 的价格低于流 flow 2 的价格.按照价格理论,因单位流量的成本低,流 flow 1 的数据流速率要高于流 flow 2 的数据流速率,这与图 5 的实验数据是一致的;在 50s~200s 时,数据流价格趋于平稳,因为突发数据的存在,其间有一些轻微的抖动.最终,数据流价格逐步收敛到固定值,也验证了 CL-QARA 算法的收敛性.

(3) 网络吞吐量分析

网络吞吐量如图 7 所示,可以看到:0s~50s 时,网络吞吐量比较分散.这是因为刚开始时数据流速率调整比较频繁,流 1 和流 2 的吞吐量有交叉现象,这说明数据流 1 和数据流 2 的数据传输速率会相互交叉;随着时间的推移,由于 CL-QARA 算法中的 CAC 接入控制子算法、BEB 改进退避算法和速率控制算法的共同作用,各个流的网络吞吐量随时间的变化而调整,逐步趋于稳定.达到平衡点后,能维持一个稳定的吞吐量数据,表明了 CL-QARA 资源分配算法的稳定性.总体而言,数据流 flow 1 的吞吐量要高于数据流 flow 2 的吞吐量.主要原因在于数据流 1 的 CBR 数据传输率比数据流 2 要高,且数据流 1 的数据发送需求高于数据流 2.这说明网络吞吐量与网络带宽需求是密切相关的,同时也表明 CL-QARA 算法是一种支持 QoS 带宽需求的资源分配算法,能够根据不同的业务需求进行资源的合理分配.

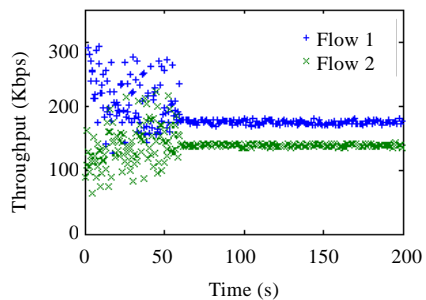
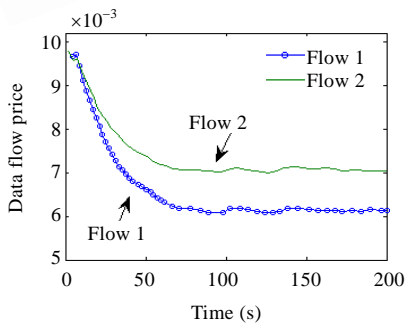


Fig.6 Change of data flow price

图 6 数据流价格变化

Fig.7 Network throughput

图 7 网络吞吐量

4.3 动态网络性能分析

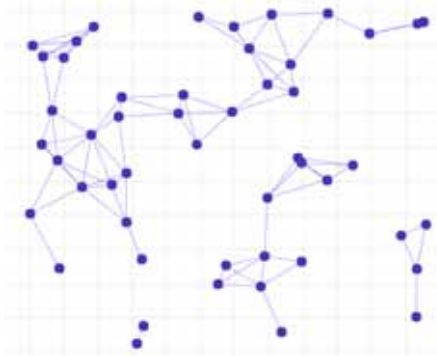


Fig.8 Dynamic topology scene

图 8 动态拓扑场景

动态网络仿真场景设置为 50 个节点随机分布在 1500×1000m² 的矩形区域内,每个节点的无线传输半径为 250m,信道容量为 2Mbps,CBR 数据源为 20 个连接,业务分组为 1 024bit;选择随机行走模型作为节点的移动模型,单个直线运动的速率服从 0m/s~ v_{max} (v_{max} 为节点的最大移动速度)的均匀分布,仿真时间为 300s,运动场景分别对应暂停时间为 0,50,100,150,200,300s 共 6 个场景;选取绝对优先级的 QoS 业务、相对优先级的业务和尽力而为的业务分别进行仿真,来评估 CL-QARA 算法在 QoS 业务保证方面的性能.仿真场景如图 8 所示.

为了评价 CL-QARA 算法的性能,我们将 CL-QARA 算法与其他资源分配算法在不同的网络载荷及移动场景下进行了对比实验.基准算法采用基本的资源分配算法及路由算法,简称 SRA 算法.该算法 MAC 层协议采用 IEEE 802.11 DCF 标准协议,路由层协议与 AODV 协议相似,以最小跳数作为选择路径的标准.在选择好路由后,端-端路径上所有可获得的集群资源按最小数量分配,当没有足够的带宽资源来满足数据流的最小需求时,该数据流的发送请求则被拒绝.若路由路径中断,对该数据流则寻找新的路由并重新分配带宽.另外两种资源分配算法是采用文献[9]提出的 altbid 算法及文献[16]提出的 RBBS 算法(详见文献[9,16]).

由图 9 可以看到,暂停时间越长,节点的移动较少,4 种算法的平均端到端时延会减少.暂停时间为 0s 时,节点移动较频繁,CL-QARA 的平均端到端时延比 SRA 算法低了 60.2ms,比 altbid 算法低了 45ms,比 RBBS 算法低了 10ms,CL-QARA 算法在移动较频繁的情况下表现出较好的性能.当暂停时间增大到 100s 以上后,CL-QARA 与其他算法的端到端时延逐步趋于稳定.在各种暂停时间的运动场景中,CL-QARA 算法的平均端到端时延都低于 SRA 算法、altbid 算法和 RBBS 算法的时延,在 4 种算法中性能表现最好.这是因为 CL-QARA 算法能合理地利用网络层的路由信息和 MAC 层的带宽及价格信息,有效地调节了网络中的流量,使整个网络的总效用达到最优,因此,网络整体的平均端到端时延较低.

图 10 显示了在不同的暂停时间下整个网络获得的平均吞吐量.可以看到,CL-QARA 的吞吐量在所有的移动场景中都是最高的.与 RBBS 相比,CL-QARA 能高出 23% 的平均吞吐量增益;与 altbid 相比,CL-QARA 高出了 43.8% 的平均吞吐量增益;与基准算法 SRA 相比,CL-QARA 平均高出了 75.2% 的增益.在暂停时间为 0 秒时(即节点处于不停的移动状态),各算法的吞吐量均较低.随着暂停时间的增大,各算法的吞吐量逐步上升.在 100s~200s 的范围,吞吐量有一个较明显的上升.这是因为暂停时间小于 100s 时,节点移动比较频繁,链路经常中断;暂停时间接近 200s 时,节点移动速率明显缓和,链路维持在一个较稳定的状况.从 200s~300s 区间,吞吐量开始趋于稳定.这是因为节点的移动更加缓慢,链路处于较稳定的状态.总体而言,CL-QARA 算法在动态移动环境下表现出了较好的适应性和稳定性.

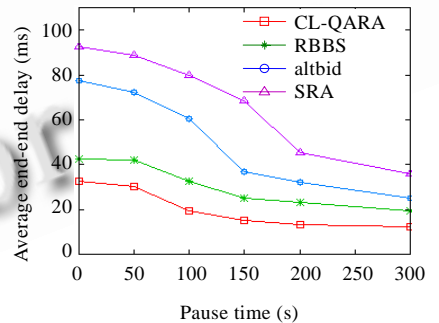


Fig.9 Average end-end delay compare

图 9 平均端到端时延比较

在不同的移动速度下测量网络总效用是衡量算法性能的一个重要指标,对此,我们对在不同的节点移动速度下将 CL-QARA 算法与其他算法进行了对比实验.在图 11 中,X 轴表示节点的平均移动速度(m/s),Y 轴为网络的累积效用.节点的最大移动速度 v_{max} 分别取 5m/s,10m/s,15m/s 和 20m/s 这 4 个值.图中的每个点代表 5 次独立实验的平均值,每次实验仿真时间为 600s,CBR 数据源为 30 个连接,业务分组为 1 024bit.

从图 11 可以看到,随着节点移动性的加大,4 种算法所得到的系统总效用都呈现了下降趋势,但各个算法的分配性能有显著区别.其中:SRA 基准算法的网络总效用在各种移动速度下都是最低的,CL-QARA 算法在 4 种算法中性能最优,在各种移动速度下均超出 SRA 算法较多;CL-QARA 算法在各分配点比 RBBS 算法总效用高出约 15%,比 altbid 算法高出约 30%.随着移动性的进一步加大,节点移动速率从 15m/s~20m/s 阶段时,RBBS 算法、altbid 算法和 SRA 算法的网络总效用都有明显的下降,而 CL-QARA 的网络总效用下降并不多,仍然显示了较好的资源分配性能.这是因为 CL-QARA 算法内在的价格驱动体系和跨层技术使得 CL-QARA 在各种移动速度下均能自适应地调整,以达到网络资源分配的全局最优.

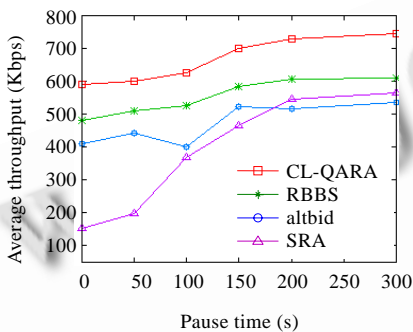


Fig.10 Average throughput compare
图 10 平均吞吐量比较

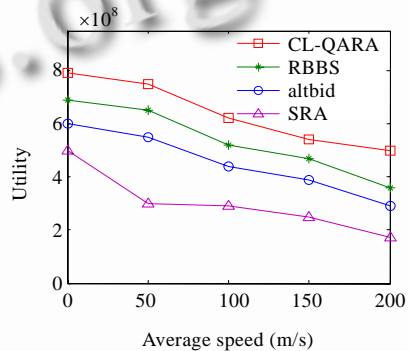


Fig.11 Utility compare in mobile scene
图 11 移动场景效用对比

5 结束语

本文在分析无线 Ad Hoc 网络资源分配模型的基础上,提出一种新的 QoS 感知的跨层资源分配算法 CL-QARA.该算法以价格驱动为核心,以 QoS 带宽需求为参数,将网络层的动态资源分配算法与 MAC 层 CSMA/CA 接入机制相结合,实现了 MAC 层与网络层的跨层技术.将网络层自适应带宽分配信息传递给 MAC 层,以改进 MAC 层的冲突退避算法,设计了改进的退避算法和呼叫接入控制 CAC 算法.通过 QoS 感知的带宽分配算法和跨层技术协同工作,为 QoS 服务提供了业务保障.仿真结果验证了 CL-QARA 算法的收敛性和公平性.将 CL-QARA 算法与 RBBS 算法、altbid 算法及 SRA 算法进行了对比实验,仿真结果表明,在平均端到端时延、网络吞吐量及网络效用 3 个指标上,CL-QARA 在 4 个算法中性能最好;且随着节点移动速度的提高,CL-QARA 的优势更加明显.表明 CL-QARA 算法在静态场景和移动场景下均能自适应地分配网络资源,提高了网络吞吐量和资源利用率,并具有较好的稳定性.

为了进一步提高资源分配算法的性能,如下几个方面的内容值得进一步深入研究:首先,本文的公平性模型选择了效用函数随速率呈对数式的变化模型,对于其他的公平性模型如线性模型、动态权重模型并没有研究;其次,如何进一步提高 MAC 层和网络层的跨层信息共享,改善资源分配性能,则是下一阶段研究的目标.

致谢 在此,我们向对本文工作给予支持和建议的所有人表示感谢.

References:

- [1] Chlamtac I, Conti M, Liu J. Mobile ad hoc networking: Imperatives and challenges. *Ad Hoc Networks*, 2003,1(1):13–64. [doi: 10.1016/S1570-8705(03)00013-1]
- [2] Kelly FP, Maulloo AK, Tan DKH. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research Society*, 1998,49(3):237–252.
- [3] Low SH, Lapsley DE. Optimization flow control: Basic algorithm and convergence. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1999,7(6): 861–874. [doi: 10.1109/90.811451]
- [4] Tassiulas L, Sarkar S. Maxmin fair scheduling in wireless networks. In: Parviz K, ed. *Proc. of the 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*. New York: IEEE Press, 2002. 763–772.
- [5] Tassiulas L. Adaptive back-pressure congestion control based on local information. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1995,40(2): 236–250. [doi: 10.1109/9.341781]
- [6] Borst SC, Whiting PA. Dynamic rate control algorithms for HDR throughput optimization. In: Broder A, ed. *Proc. of the 20th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*. Helsinki: IEEE Press, 2001. 976–985.
- [7] Xue Y, Li B, Nahrstedt K. Price-Based resource allocation in wireless ad hoc networks. In: Kevin J, Ion S, Klaus W, eds. *Proc. of the 11th Int'l Workshop on Quality of Service (IWQoS)*. Monterey: IEEE Press, 2003. 79–96.
- [8] Xue Y, Li B, Nahrstedt K. Optimal resource allocation in wireless ad hoc networks: A price-based approach. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006,5(4):347–364. [doi: 10.1109/TMC.2006.1599404]
- [9] Curescu C, Nadjm-Tehrani S. Price/Utility-Based optimized resource allocation in wireless ad hoc networks. In: Garcia-Luna-Aceves J, ed. *Proc. of the 2nd Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*. Santa Clara: IEEE Press, 2005. 85–95.
- [10] Curescu C, Nadjm-Tehrani S. Time-Aware utility-based resource allocation in wireless networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2005,16(7):624–636. [doi: 10.1109/TPDS.2005.87]
- [11] Luthi M, Nadjm-Tehrani S, Curescu C. Comparative study of price-based resource allocation algorithms for ad hoc networks. In: *Proc. of the 20th Int'l Parallel and Distributed Processing Symp. (IPDPS)*. Rhodes Island: IEEE Press, 2006. 1–10.
- [12] Bertsekas D. *Nonlinear Programming*. 2nd ed., Belmont: Athena Scientific, 1999. 191–272.
- [13] Chakeres ID, Belding-Royer EM. PAC: Perceptive admission control for mobile wireless networks. In: *Proc. of the 1st Int'l Conf. on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks*. Dallas: IEEE Press, 2004. 18–26.
- [14] Zhang W. *Studies on the performance, capacity, and resource allocation strategy in IEEE 802.11e networks* [Ph.D. Thesis]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [15] Marina MK, Das SR. On-Demand multipath distance vector routing in ad hoc networks. In: *Proc. of the 9th Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP)*. Riverside: IEEE Press, 2001. 14–23.
- [16] El-Kadi M, Olariu S, Abdel-Wahab H. A rate-based borrowing scheme for QoS provisioning in multimedia wireless networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2002,13(2):156–167. [doi: 10.1109/71.983943]

附中文参考文献:

- [14] 张伟. IEEE 802.11e 的网络性能、容量评估与资源分配策略研究[博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008.



韩冰青(1979 -),男,江苏兴化人,博士生,讲师,主要研究领域为 Ad Hoc 网络,网络抗毁,智能优化算法.



刘凤玉(1943 -),女,教授,博士生导师,主要研究领域为信息安全,人工智能.



张宏(1956 -),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络安全,信息安全.



陈伟(1976 -),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为审计信息化.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn